

on reconnaît certaines des quatre espèces dans les mains d'un personnage. Pourtant, la morphologie de l'étranger ne correspond pas à ce qui est peint : ce fruit n'a pas la trace circulaire que l'on distingue sur le tableau. P. Schmidt propose donc que le fruit est une sorte de citron aux formes noueuses, mais sans préciser lequel.

Les fruits du genre *Citrus* étaient exotiques dans les Flandres du début du XV^e siècle, mais Jan van Eyck a beaucoup voyagé en Europe du Sud, et notamment en Espagne. Il a sans doute vu plusieurs de ces fruits dont il a pu rapporter des spécimens. Et il n'a pu qu'être séduit par ceux nommés... « pommes d'Adam », c'est-à-dire ceux de l'espèce *Citrus lumia*, variété *pomum adami*. De fait, ces fruits sont bien dotés d'une trace circulaire semblable à celle du fruit d'Ève ; cette trace évoque une morsure, celle du premier homme. Selon une équipe de généticiens de l'Université de Catane, en Italie, les « pommes d'Adam » seraient parmi les premiers hybrides connus entre un pomelo, un citron et un lime.

Marco Polo aurait vu la pomme d'Adam en Perse et elle aurait été importée au Proche-Orient par les Arabes, puis en Europe par les Croisés, au milieu du XIII^e siècle. Ces fruits existent encore dans certains conservatoires dédiés aux agrumes (page ci-contre, un fruit semblable à celui d'Ève). Le Paradis est perdu, mais le fruit s'est défendu ! ■

D. Huylebrouck et B. Mecs, *Het Fruitmysterie van het Lam Gods*, EOS, Anvers, juin 2011.



akg-images

IDÉES DE PHYSIQUE

La courbe antisecousse

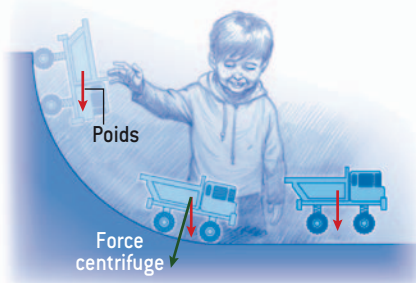
La spirale de Cornu, ou clothoïde, est utilisée en travaux publics dans l'amorce des virages : cette courbe évite aux véhicules des secousses intempestives.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment construire une route ou une voie de chemin de fer qui serpente ? Les amateurs de modélisme réalisent leurs circuits avec des rails rectilignes et en arcs de cercle. Ils ignorent que, lors de la transition entre un rail droit et un rail circulaire, un passager serait fort incommodé par une secousse brutale ! Il existe pourtant une solution : construire les virages en forme de clothoïde, aussi nommée spirale de Cornu. Ce tracé, où la courbure en chaque point est proportionnelle à la distance parcourue jusqu'à ce point, est notamment au service des bretelles d'autoroute et des loopings des montagnes russes.

Éviter les discontinuités de l'accélération

La force subie par un véhicule est proportionnelle à son accélération, c'est-à-dire à la variation de sa vitesse par unité de temps. Cette variation peut porter sur la valeur de sa vitesse, par exemple lors du démarrage ou d'un freinage, mais aussi résulter d'un changement de direction. Afin d'éviter que la force résultante ne soit trop élevée et ne fasse dérailler le véhicule, cette variation doit être progressive. C'est pourquoi, en dehors des croisements, les routes et les voies de chemin de fer sont constituées de segments droits reliés par des segments courbes. En choisissant des



1. EN PASSANT D'UN TRAJET circulaire à un trajet rectiligne, le véhicule subit une discontinuité de la force centrifuge, qui s'annule brutalement. Les suspensions, qui se sont comprimées lors de la descente sous l'effet de cette force et du poids, se détendent alors en partie (car il reste le poids), d'où un rebond du véhicule.

courbes en arc de cercle, donc d'un rayon de courbure constant, la force centrifuge subie par le véhicule est constante si ce dernier a une vitesse constante en module. Ainsi, le véhicule ne dérape pas s'il entame la courbe à la vitesse appropriée.

L'arc de cercle serait-il donc la courbe idéale ? Ce raisonnement ignore une propriété répandue : l'élasticité. Un objet élastique se déforme proportionnellement à la force qui lui est appliquée. Si cette force s'annule d'un coup, toute l'énergie élastique stockée est instantanément libérée. Pour en comprendre les conséquences sur un véhicule, considérons un modèle simple de montagnes russes : un arc de cercle vertical se prolongeant en son point le plus bas par une ligne horizontale (voir la figure 1).

Lâchons une roue le long de l'arc et imaginons qu'elle roule dessus sans frottement. Elle accélère à mesure qu'elle descend. Dans son référentiel, la roue subit, outre son poids, deux forces radiales : la force centrifuge appliquée à son centre d'inertie et la réaction centripète du rail appliquée sur son bord. Sa vitesse est maximale au bas de l'arc de cercle, et il en est de même de la force centrifuge et de la réaction du rail.

Sous l'effet de ces deux forces, la roue se comprime et va entamer son mouvement sur le segment droit dans un état de déformation maximale. Or à cet endroit, la trajectoire devient subitement rectiligne : la force centrifuge disparaît, la roue se détend et

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

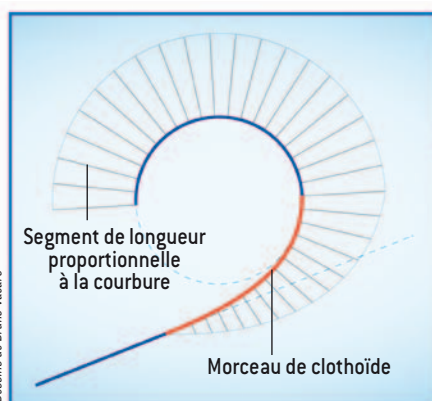
l'énergie élastique stockée se libère. Le calcul montre que cette libération peut provoquer un rebond : alors que la jonction entre les rails est continue et sans arête, la roue est susceptible de décoller ! Ce rebond n'existerait pas si l'on modélisait la roue par un point (une tentation de théoricien...). Quels que soient la nature et le lieu de la déformation (moyeu, amortisseur, etc.), le rebond est dû à la discontinuité de l'accélération et montre qu'il convient de s'intéresser aux variations temporelles de celle-ci.

Une douce spirale

Chacun a pu ressentir une telle secousse, par exemple lorsque le conducteur d'un véhicule freine et ne relâche pas la pédale juste avant l'arrêt. Au cours de la phase de décélération, les passagers du véhicule subissent une force d'inertie orientée vers l'avant. La vitesse décroît progressivement, jusqu'à s'annuler à l'arrêt du véhicule. À cet instant, la décélération et la force d'inertie cessent brusquement et nous avons l'impression d'être projetés sur le dossier du siège. Pour éviter ce désagrément, il ne suffit pas de réduire l'accélération : dans ce cas précis, il faut qu'elle s'annule au même instant que la vitesse. C'est pourquoi le conducteur ajuste la pression qu'il exerce sur la pédale de frein juste avant l'arrêt.

Intéressons-nous maintenant au cas d'un véhicule roulant à vitesse constante (en module). Comment assurer une accélération qui soit continue tout au long du parcours ? En tout point, l'accélération est proportionnelle à la courbure de la trajectoire, c'est-à-dire à l'inverse du rayon de courbure (et dirigée vers le centre de courbure).

Avec une courbure constante, on garantit évidemment la continuité de l'accélération, mais les trajectoires sont alors soit des droites, soit des cercles. La solution la plus simple pour varier les trajectoires est de faire appel à des courbes dont la courbure (et, partant, l'accélération) augmente linéairement avec la distance parcourue. Une telle courbe, qui s'enroule peu à peu sur elle-même, n'est autre que la clothoïde, connue également sous les noms de spirale de Cornu, spirale d'Euler ou encore spirale de Fresnel.



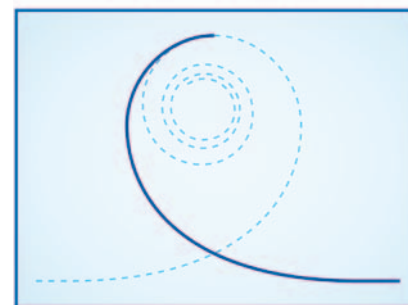
2. EN CHAQUE POINT D'UNE CLOTHOÏDE, ou spirale de Cornu, la courbure (l'inverse du rayon de courbure) est proportionnelle à la distance parcourue jusqu'à ce point. Elle permet de raccorder (partie rouge) un trajet rectiligne à un trajet circulaire (en bleu) de telle sorte que la courbure varie continûment. On y fait appel pour concevoir les bretelles d'autoroutes.

Les bretelles qui relient une route à une autre ont souvent la forme de clothoïde, notamment dans les échangeurs d'autoroute. Elle est en effet particulièrement adaptée pour joindre un segment droit à un segment en arc de cercle, puisque sa courbure peut varier continûment de zéro, à son début, jusqu'à la valeur du rayon de l'arc de cercle (voir la figure 2).

La combinaison clothoïde-arc de cercle-clothoïde permet même de relier deux segments droits. Par ailleurs, pour qu'un véhicule de vitesse constante suive une route en clothoïde, le conducteur doit tourner son volant à vitesse angulaire constante, une manœuvre plus aisée que d'autres. Enfin, la force centrifuge subie par les passagers augmente de façon continue et leur confort est donc maximal.

Des loopings plus confortables

On retrouve la clothoïde dans les chemins de fer et notamment pour les trains rapides. Dans les virages où la vitesse est élevée, la voie présente un dévers, c'est-à-dire une inclinaison choisie de façon que la résultante du poids et de la force centrifuge soit perpendiculaire au plan de la voie. Les rails ne subissent alors pas de forces latérales de la part du train. Un calcul simple montre que le dévers



3. LES LOOPINGS des montagnes russes sont aujourd'hui souvent formés de deux morceaux symétriques de clothoïde (en trait plein sur le schéma : l'un des deux morceaux ; en pointillés : la clothoïde symétrique, plus complète). Cette forme de trajectoire permet non seulement d'éviter des secousses, mais aussi de diminuer l'accélération ressentie par les passagers dans la partie basse du looping, là où leur vitesse est la plus grande.

Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr



■ BIBLIOGRAPHIE

R. Müller, *Roller coasters without differential equations – a Newtonian approach to constrained motion*, *European Journal of Physics*, vol. 31(4), pp. 835-848, 2010.

A.-M. Pendrill, *Rollercoaster loop shapes*, *Physics Education*, vol. 40(6), p. 517, 2005.

W. F. D. Theron, *Bouncing due to the “infinite jerk” at the end of a circular track*, *American Journal of Physics*, vol. 63(10), p. 950, 1995.

doit être proportionnel à l'accélération, donc à la courbure. Pour que le dévers évolue de façon continue à partir d'une voie horizontale, il faut donc que l'accélération en fasse de même, d'où l'intérêt des clothoïdes.

Une autre application des clothoïdes porte sur les montagnes russes (voir la figure 3). Les loopings modernes ne sont plus forcément circulaires. En dehors du problème déjà évoqué de la secousse lors de la transition du cercle à la droite, un autre désagrément provient des accélérations subies par le passager. Si l'on souhaite qu'au point le plus haut, la force centrifuge compense le poids (avec la tête en bas, les épaules n'appuieront pas sur le harnais), on s'aperçoit que tout en bas, dans le cas d'un looping circulaire, elle lui serait cinq

fois supérieure : l'accélération ressentie par le passager serait alors égale à $6g$, six fois l'accélération de la pesanteur, valeur difficilement acceptable pour un public familial !

Cette forte accélération a pour origine le fait que la vitesse du wagon, donc la force centrifuge [à courbure constante], diminue à mesure que le véhicule s'élève : la condition à respecter au sommet impose une vitesse d'entrée dans le looping trop élevée. En choisissant un looping au moins partiellement en spirale de Cornu, on entame la montée avec des courbures faibles à vitesse élevée et on l'achève avec des courbures plus fortes, mais une vitesse inférieure. L'accélération ressentie peut ainsi être ramenée à des valeurs plus supportables (autour de $3g-4g$), notamment pour les enfants. ■

france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

SCIENCE & GASTRONOMIE

De l'huile en perles

Des chercheurs brésiliens ont conçu une méthode simple pour encapsuler des pigments ou des composés odorants qui, le plus souvent, ne sont pas solubles dans l'eau.

Hervé THIS



La cuisine moléculaire a popularisé des perles à cœur liquide, analogues à du caviar : perles de jus d'orange, de cognac, de sirop de sucre, etc. La confection de ces objets est facile, quand on accepte que la gélatine ne soit pas le seul agent gélifiant et que les agar-agar, carraghénanes, alginate et autres gommes (xanthane, guar, caroube...) peuvent rendre service. La clé de l'affaire est la gélification instantanée d'un polysaccharide extrait d'algues, l'alginate de sodium, en présence d'ions calcium. Deux méthodes ont été mises au point.

Dans la méthode dite directe, on dissout de l'alginate de sodium dans un liquide goûteux (par exemple du jus de fraises), dont on fait tomber des gouttes dans de l'eau contenant des ions calcium (lactate de sodium, chlorure de sodium...) : les ions calcium lient sur-le-champ les molécules d'alginate, formant une peau gélifiée autour du liquide. Un rinçage immédiat et prolongé s'impose, pour éviter que les ions calcium excédentaires ne migrent vers l'intérieur des perles et ne gélifient toute la goutte.

La méthode dite inverse évite cet écueil. Cette fois, on dissout les ions calcium dans le liquide qui a du goût, et l'on fait tomber les gouttes de ce liquide dans un bain d'eau où l'on a dissous l'alginate de sodium. Là encore, il y a gélification sur la périphérie de la goutte ; mais les molécules d'alginate, plus grosses, diffusent peu vers l'intérieur, ce qui laisse un bon cœur liquide, avec un contraste de consistance bienvenu.

Comment confectionner des billes contenant de la matière grasse ? Fabiana

Perrechil et ses collègues de l'Université de Campinas, au Brésil, ont exploré la gélification d'émulsions à double couche de surface, obtenue à l'aide de caséinate de sodium et de carraghénanes kappa.

Les industries alimentaire et pharmaceutique étudient depuis longtemps la question de l'encapsulation des composés hydrophobes, car pigments, vitamines, composés odorants, nutriments, principes actifs, etc., sont souvent solubles dans l'huile et pas dans l'eau. Comment faire des « billes d'huile » ? Les solutions sont nombreuses, mais toutes ne sont pas utilisables dans une cuisine domestique.

Une solution simple consiste à produire une émulsion de l'huile à encapsuler, puis à disperser cette émulsion comme on l'aurait fait d'une solution aqueuse. Toutefois, les émulsions sont peu stables, de sorte que l'ajout d'émulsifiants ou de protéines est souvent nécessaire.

La solution brésilienne utilise des produits popularisés par la cuisine moléculaire : les caséinates de sodium (produits à partir du lait) et les carraghénanes kappa (obtenus à partir d'algues), en vente dans les « bonnes épiceries » et sur Internet.

F. Perrechil et ses collègues ont donné la recette des billes d'huile (*Food Biophysics*, vol. 7, pp. 264-275, 2012). D'abord, on réalise une solution de caséinate de sodium à dix pour cent, en dispersant le caséinate au mixeur. Ensuite, on prépare une solution de carraghénane kappa à trois pour cent en dissolvant le polysaccharide dans de l'eau, puis en chauffant à environ 90 °C, tout en mixant vigoureusement.

On prépare alors l'émulsion « huile dans eau » en dispersant l'huile, qui contient les aromates et les parfums, dans la solution de caséinate à l'aide d'un mixeur, afin que la concentration finale en caséinate soit de 0,5 pour cent et la concentration en huile de 30 pour cent.

L'étape suivante consiste à former une émulsion « huile dans eau » en dispersant l'émulsion primaire dans la solution de carraghénane kappa (toujours au mixeur). Enfin, on forme des microbilles en extrudant les émulsions à doubles couches dans une solution de chlorure de potassium. Les billes les plus petites sont obtenues pour des diamètres d'orifice d'injection de 1,2 millimètre, quand ces billes tombent d'assez haut dans le bain de chlorure de potassium. L'ajout de sucre à ce bain stabilise les billes.

La liste d'ingrédients ne plaira guère aux cuisiniers les plus conservateurs, ni aux mangeurs exclusifs de poulet rôti. Elle ne devrait pas rebuter les autres, pour qui la découverte d'un mets nouveau fait plus de bonheur que la découverte d'une étoile ! ■



Hervé THIS est chimiste dans le Groupe INRA de gastronomie moléculaire, professeur à AgroParisTech et directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Académie des sciences).

Retrouvez les articles de H. This sur www.pourlascience.fr

